

Dispositionsstrategien für einen energieeffizienten Bahnbetrieb

Untersuchung des Einflusses verschiedener Dispositionsstrategien auf den Traktionsenergiebedarf und die Verspätung

Benedikt Scheier
Tilo Schumann
Jacob Kohlruß

Einführung und Motivation

Der energieeffiziente Bahnbetrieb ist bereits seit langer Zeit ein Forschungsfeld. Dieses verspricht Einsparungen ohne aufwändige Änderungen in der Infrastruktur vornehmen zu müssen. Bereits zu Zeiten des Dampflokbetriebes gab es eine Belohnung für den Lokführer, wenn er sparsam fuhr. Der Großteil der Forschungsaktivitäten zur Verringerung des Energieverbrauchs konzentriert sich auf die Fahrweise und die Entwicklung von Systemen, die dem Fahrer Hinweise geben. Da sich die Triebfahrzeugführer häufig auf unterschiedlichen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Massen, Fahreigenschaften und Halteschemen befinden, kann in vielen Fällen ohne technische Unterstützung kein Optimum erreicht werden. Es gibt eine Vielzahl von Systemen, die ein optimales Fahrprofil ermitteln und daraus Fahrempfehlungen ableiten. Sie unterscheiden sich durch die Tiefe der Vorgabe (von reiner Information

zum umliegenden Verkehr, über eine empfohlene Geschwindigkeit bis zur Vorgabe der Fahrhebelstellung oder der Bremsung). Die Verkehrsart spielt auch eine Rolle: Bei S-Bahnen genügt häufig die Information, bis zu welcher Geschwindigkeit beschleunigt werden soll, bevor das Ausrollen beginnt. Für den Fernverkehr ist der Punkt interessant, ab dem ausgerollt werden kann und für schwere Züge auf Güterverkehrsstrecken (Anwendung beispielsweise in Australien [1] und Nordschweden [2]) ist eine Optimierung der Ankunftszeit im Kreuzungsbahnhof interessant.

Die energieeffiziente Fahrweise wird häufig nicht mehr angewendet, wenn der Zugverkehr unplanmäßig läuft, da in diesem Falle alle Reserven für die Reduzierung der Verspätung genutzt werden. Aber auch in solchen Fällen kommt es zu Konflikten auf der Strecke, bei denen ein optimiertes Fahrprofil Einsparungen ermöglicht ohne die Verspätung zu vergrößern. In einigen Situationen kann die Verspätung sogar verringert werden. Wenn dabei auch der Streckendurchsatz steigt, hat auch das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) ein Interesse an einer Optimierung. Bei einer

reinen Energieeinsparung würde der Nutzen nur dem Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) zu Gute kommen, während der Aufwand der Informationsbereitstellung beim Netzbetreiber liegt. In Deutschland entwickelt z. B. die DB Netz mit dem Projekt FreeFloat bzw. der Leitsystemerweiterung KE/KL+ZLR (Konflikterkennung, -lösung und Zuglaufregelung) ein System zur Betriebsoptimierung [3].

Im Rahmen der Grundlagenforschung beschäftigt sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) mit der Frage: Inwiefern können gezielte Dispositionsentscheidungen (hauptsächlich die Änderung der Zugreihenfolge) zur Einsparung von Energie führen? Dabei gilt als Randbedingung, dass die Gesamtverspätung und die Streckenleistungsfähigkeit möglichst nicht negativ beeinflusst werden.

Methodik der Untersuchung

Für die Untersuchung von Dispositionsstrategien zum energieeffizienten Bahnbetrieb ist aufgrund der komplexen Fragestellung und Randbedingungen eine Methode erforderlich, die zum einen ein Abbild der Infrastruktur und des Betriebes (Modell) und zum anderen Dispositionsstrategien beinhaltet (Abb. 1).

Das Modell dient als Grundlage der Untersuchung. Mit ihm wird eine Referenz geschaffen, mit der die unterschiedlichen Dispositionsstrategien angewendet und verglichen werden können. Es besteht dabei aus einem Untersuchungsraum mit zugehörigen Infrastrukturdaten, einem realistischen Fahrplan für den Untersuchungszeitraum und Modellzügen, die unterschiedliche fahrdynamische Eigenschaften aufweisen und den Fahrplan erfüllen. Diese Daten werden in einem Eisenbahnbetriebssimulationstool eingegeben. Hier wird das Tool RailSys der Firma RMCon verwendet, da hier eine Bildfahrplanansicht zur Verfügung steht, bevor die Simulation gestartet ist. Dies ist ähnlich der Situation eines Disponenten.

Die Dispositionsstrategien orientieren sich an den Eigenschaften der Modellzüge. Diese werden aufgrund ihrer Eigenschaften bei einer Verspätung oder einem Konfliktfall in der Simulation priorisiert. Dies kann z. B. zu Zugüberholungen führen. Die Dispo-

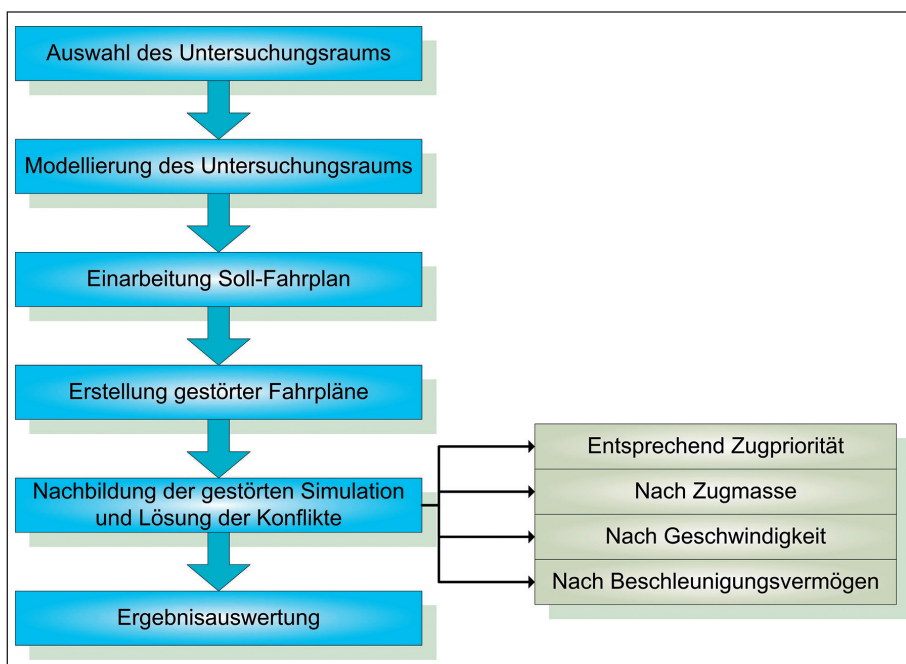


Abb. 1: Methode der Untersuchung

Grafik: eigene Darstellung

sitionsstrategien definieren sich durch die Priorität, die nach folgenden Kriterien gewählt wird:

- Strategie S, Standard (Fernverkehr vor Regionalverkehr vor Güterverkehr),
- Strategie E, höchste Priorität für Züge mit höchstem Mehrenergiebedarf durch außerplanmäßigen Halt,
- Strategie M, höchste Priorität für Züge mit größter Masse und
- Strategie Z, höchste Priorität für Züge mit höchstem Zeitverlust durch außerplanmäßigen Halt.

Die Durchführung der Dispositionsstrategien erfolgt nun im Eisenbahnbetriebsmodell. Hierbei kommen aufgrund der Simulationseigenschaften zwei Verfahren zum Einsatz, zum einen automatisch durch den Dispositionsassistenten in RailSys und zum anderen durch manuell durchgeführte Dispositionsmaßnahmen anhand des Bildfahrplans. Der Dispositionsassistent in RailSys hat den Vorteil, dass eine große Anzahl von Simulationsdurchläufen mit unterschiedlich gestörten Fahrplänen durchgeführt werden kann. Der Vorteil der manuellen Disposition ist durch das konsequente Umsetzen der definierten Strategien gegeben. Dies ist durch den Dispositionsassistenten nicht möglich. In diesem Artikel wird ausschließlich auf die Ergebnisse der manuellen Disposition eingegangen.

Der Untersuchungsraum „Knoten Lehrte“

Für das Eisenbahnbetriebsmodell wurde das Szenario eines Eisenbahnknotens gewählt, welches mehrere Randbedingungen erfüllt, unter anderem eine große Anzahl von Konflikten „verspricht“. Folgende Randbedingungen wurden definiert:

- Mindestens vier Bahnstrecken führen in den Knoten.
- Es finden alle Arten von Verkehr statt (Personenfern-, -nah- und Güterverkehr).
- Verkehrsmischung: 80 bis 160 km/h auf einer Strecke,
- Fernverkehr: fährt mindestens 140 bis 160 km/h,
- Auslastung der Strecken: mindestens 75% (Blockbelegungszeiten),
- Vermeidung eines überdimensionierten Knotens (z. B. Frankfurt/Main oder München wären für die Modellbildung zu aufwändig),
- möglichst wenig Überwerfungs- und Unterwerfungsbauwerke sowie
- Größe des Untersuchungsraums: bis zum nächsten Überholbahnhof/Abzweig.

Die eigentliche Auswahl wurde in [4] durchgeführt und beschrieben. In der Bewertung schneidet der Knoten Lehrte am besten ab, da hier eine hohe Anzahl an Bahnstrecken zusammenführen, Fernzüge

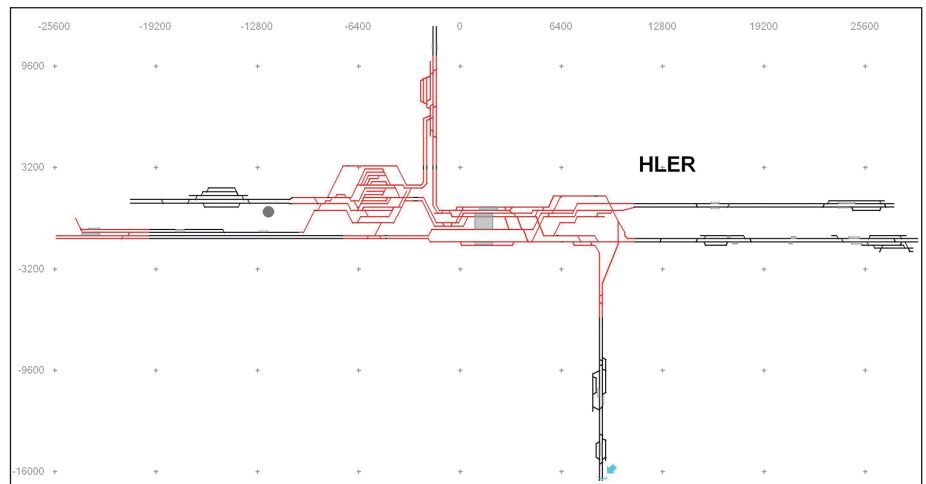


Abb. 2: Gleisplan des Untersuchungsraums Lehrte und der Nachbarbahnhöfe

Grafik: aus RailSys

mit hoher Geschwindigkeit fahren, relativ viel Nahverkehr stattfindet und Lehrte ein Knoten mit einer sehr großen Güterzugbelastung ist. Knoten entlang der Schnellfahrstrecke Hannover – Würzburg wurden beispielsweise ausgeschlossen, da die weitgehend separate Führung der Neubaustrecke (NBS) nur wenige Konflikte erwarten lässt. Andere Knoten wurden wegen ihres gering ausgeprägten Zugmixes verworfen. Weiterer Vorteil von Lehrte ist ein hier passierender Güterzug, der bereits aktuell gegenüber dem ICE höher priorisiert ist (Erzzug von Hamburg nach Salzgitter), zu simulieren.

Die Größe des Untersuchungsraums wurde so gewählt, dass die Strecken mindestens jeweils bis zum nächsten Bahnhof modelliert werden, in dem eine Zugreihenfolgeänderung durchgeführt werden kann. Abb. 2 stellt die modellierte Infrastruktur für den Untersuchungsraum dar. Rechts sind die Strecken nach Wolfsburg

und Braunschweig zu sehen, nach unten führt die Strecke nach Hildesheim, nach links führen die drei Strecken nach Hannover und nach oben die Strecke nach Celle. Im östlichen Bahnhofskopf wurde die Einfahrkurve mit dem Überwerfungsbauwerk nachgebildet. Links vom Abzweig nach Celle ist der Güterbahnhof zu erkennen.

Fahrplan und Störungsszenarien

Der Simulationszeitraum umfasst die Stunde von 7 bis 8 Uhr mit einer Vor- und Nachlaufzeit, so dass alle Zugfahrten in der Kernstunde erfasst sind. Der Personenverkehr entspricht dem des Fahrplanjahres 2010. Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, fahren alle Personenzüge, die den Knoten Lehrte passieren nach Hannover oder kommen von dort. Die Streckenbelastung von 306 Zügen pro Tag verteilt sich auf zwei Strecken: für Regional- und Fernverkehr stehen zwei Gleise zur Verfügung, für die

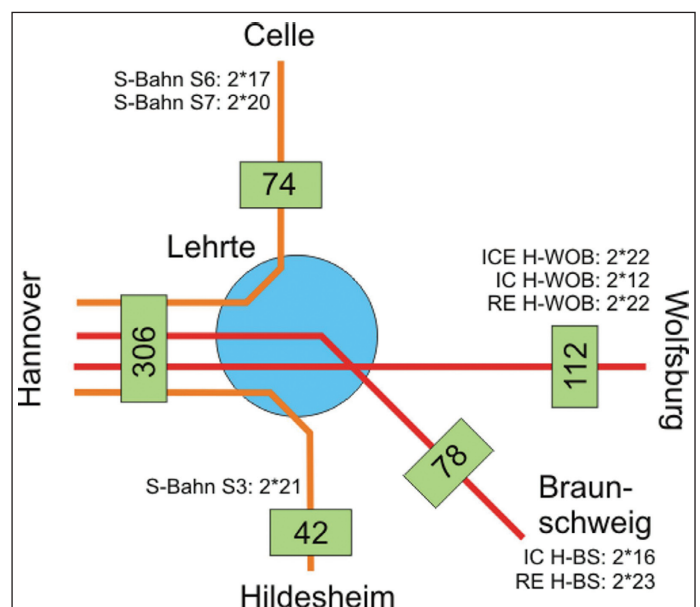


Abb. 3: Modellierte Personenzüge (Anzahl und Typen)

Grafik: eigene Darstellung

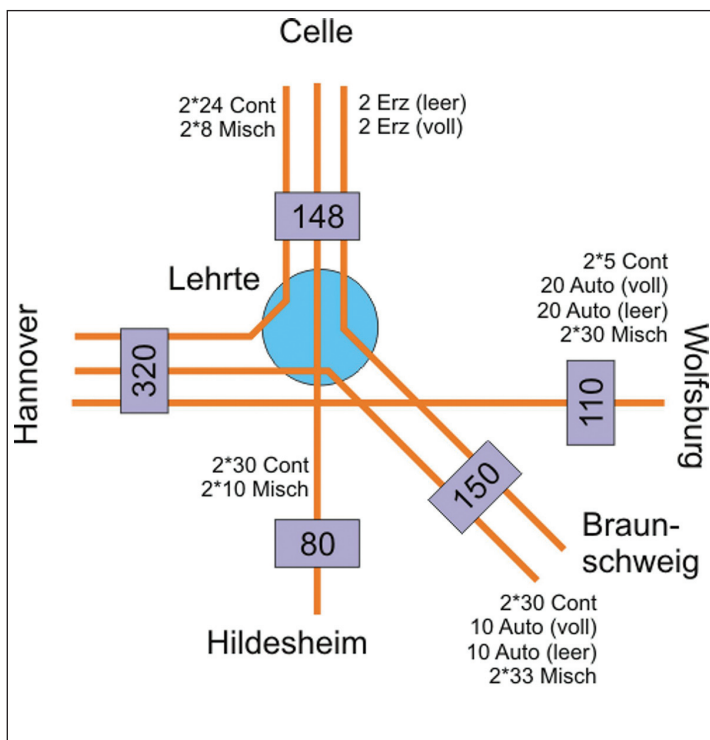


Abb. 4: Modellierte Güterzüge (Anzahl und Typen)
Grafik: eigene Darstellung

Grundlage. Die Güterströme verlaufen in alle Richtungen, die Relation Hannover – Braunschweig ist jedoch die am stärksten belastete (Abb. 4).

Insgesamt ist der Bahnhof Lehrte in der Stunde von 7 bis 8 Uhr mit 29 Zügen belegt, davon sind ca. die Hälfte Güterzüge. Für die Erstellung gestörter Szenarien wurden stark gestörte Betriebstage angenommen. Die Einbruchsverspätungen liegen beim Personennahverkehr (SPNV) bei bis zu 15 Minuten, beim Personenfernverkehr (SPFV) bei bis zu 30 Minuten und beim Güterverkehr (GV) bis zu 60 Minuten. Der Anteil verspäteter Züge (Verspätungen zählen ab 1 Minute) liegt im SPNV bei 40%, im SPFV bei 50% und im GV bei 70%. Innerhalb des Untersuchungsraums entstehen auch Verspätungen: die Hälfte der Personenzüge erhält Haltezeitverlängerung von durchschnittlich 1 Minute.

Ergebnis der Dispositionsstrategien

Da in der Disposition die Ziele pünktlicher Betrieb (Betriebsqualität) sowie Erhalt und Steigerung der Streckenleistungsfähigkeit im Vordergrund stehen, ist eine Betrachtung des Beschleunigungsvermögens der Züge erforderlich. Bei einer energieoptimierten Disposition sind die Züge als Randbedingung möglichst nur dann zu benachteiligen, wenn sie in der Lage sind, schnell wieder auf ihre Betriebsgeschwindigkeit zu beschleunigen.

Zu den Dispositionsmaßnahmen mit Potenzial für Energieeinsparung gehört die richtige Entscheidung für die Zugreihenfolge. Der benachteiligte Zug muss in der Regel außerplanmäßig anhalten. Entweder geschieht dies vor dem Abschnitt mit dem Belegungskonflikt oder durch eine Verlegung auf das Überholgleis und die Überholung. Der maßgebliche Energie-mehrverbrauch kommt also durch einen außerplanmäßigen Halt zustande.

Zur Bewertung der Auswirkungen wurden alle Zugtypen aus ihrer typischen Betriebsgeschwindigkeit zu einem Halt gebracht und beschleunigten anschließend wieder. Die Ergebnisse zur Fahrzeitverlängerung und dem Energiemehrbedarf sind in Abb. 5 der Vergleichbarkeit halber normiert zu sehen.

Hier wird deutlich, dass von außerplanmäßigen Halten neben den beladenen Güterzügen auch der ICE stark betroffen ist. Während der Fahrzeitverlust beim Erzzug am größten ist, hat der ICE den größten Energiemehrbedarf bei einem zusätzlichen Halt. Die Praxis bei der DB, dem vollen Erzzug den Vorrang zu geben, hat daher einen positiven Einfluss auf die Streckenleistungsfähigkeit und die Pünktlichkeit. Wenn dadurch allerdings ein ICE aus voller Fahrt zum Stehen kommt, ist der Energiemehr-

S-Bahn eine teilweise eingeleiste Strecke. Es gibt vier Zugtypen: ICE, IC, Regionalexpress mit lokbespanntem Doppelstockzug sowie S-Bahn-Triebzug.

Für den Güterverkehr steht zwischen Lehrte und Hannover eine separate zweigleisige Strecke zur Verfügung, auf den übrigen Strecken findet gemischter Verkehr statt. Für den Güterverkehr sind vier Typen definiert: Containerzug, Autozug, Mischgüterzug und Erzzug. Für den Autozug und den Erzzug wurden jeweils eine leere und eine beladene Variante eingeführt. Beim Erzzug handelt es sich um den schwersten Zug in Deutschland, einen 640 m langen 5900 t

schweren Zug, der Eisenerz von Hamburg nach Salzgitter bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h transportiert. Die übrigen Güterzüge haben im beladenen Zustand eine Masse von rund 1100 bis 1300 t und Längen von 500 bis 700 m. Der Luftwiderstandsbeiwert ist bei den leeren Zügen höher als für beladene. Daher ist insbesondere der leere Autozug nicht in dem Maße energiegunstiger, wie die geringere Masse erwarten lässt.

Die Anzahl und Verteilung der Güterzüge wurde aus mehreren Quellen abgeleitet, insbesondere die Studie zur Hafen-hinterlandanbindung [5] diente hier als

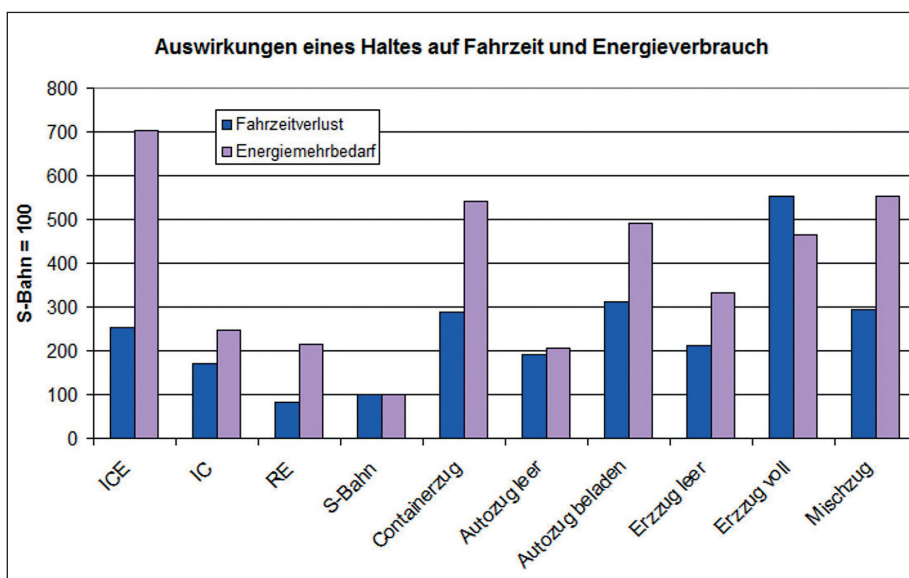


Abb. 5: Auswirkungen eines Haltes auf die Fahrzeit und den Energieverbrauch

Grafik: eigene Darstellung

bedarf deutlich gravierender. Da dem Energieverbrauch bislang bei der Disposition kaum Bedeutung beigemessen wird, kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass die Priorisierung des vollen Erzzuges ausschließlich aus streckenkapazitiven und nicht aus energetischen Gründen erfolgt. Im nächsten Schritt werden Simulationen durchgeführt, bei denen Strategien verfolgt werden, die sich dadurch auszeichnen, dass die Zugpriorität stringent entsprechend definierter Kriterien festgelegt wird. Dabei spielen Gedanken wie der Abbau von Verspätungen von langlaufenden Personenzügen keine Rolle. Es sollen auch die Auswirkungen einer bedingungslosen Bevorzugung des Güterverkehrs geprüft werden. Dies ist eine durchaus realistische Annahme für einen begrenzten Untersuchungsraum eines Eisenbahnknotens, da dort zur Abwicklung eines flüssigen Betriebes durchaus andere Maßstäbe angesetzt werden können als auf längeren Strecken. Folgende Dispositionsstrategien wurden definiert:

- Alle Züge haben dieselbe Priorität.
- Priorität nach Mehrenergiebedarf,
- Priorität nach Zeitverlust,
- Priorität nach Zugmasse,
- Priorität nach Zuglänge sowie
- Priorität nach Höchstgeschwindigkeit des Zuges.

In Abb. 6 sind die zwei Größen Energieverbrauch (Traktionsenergie) und Verspätungssumme für die bearbeiteten Fahrpläne ersichtlich (Verspätung bei Ausbruch der Züge aus der Simulation). Im (ungestörten) Sollfahrplan gibt es keine Verspätungen, der Energieverbrauch liegt bei 28,5 MWh. Der Istfahrplan ist der nachgebildete gestörte Fahrplan, der als Referenz für die manuell bearbeiteten Fahrpläne dient. Die Ergebnisse des Szenarios Prio Energie, bei dem die Züge entsprechend des erforderlichen Energieverbrauchs eines zusätzlichen Anfahrvorgangs priorisiert werden, zeigen, dass die Fokussierung auf Energieeffizienz nennenswerte Einsparungen ermöglicht. Der Energieverbrauch sinkt von ca. 32,6 auf 27,8 MWh, dies entspricht einer Einsparung von 14,6%. Die Verspätungssumme steigt an, da an einigen Stellen Züge priorisiert werden, die langsamer sind. Das Szenario Prio Masse, bei dem die schwersten Züge priorisiert werden, zeigt ähnliche Ergebnisse, allerdings ist hier die Verspätungssumme höher. Die Ergebnisse des Szenarios Prio Geschw., bei dem die standardmäßige Priorisierung (schnellste Züge zuerst) angewendet wird, lassen sich durch das „Verbiegen“ erklären. Durch das langsamere Hinterherfahren liegt der Energieverbrauch niedriger, es entstehen aber mehr Verspätungsminuten. Das Szenario Prio Zeit bedingt im Vergleich die höchste Verspätungssumme. Die Priorität,

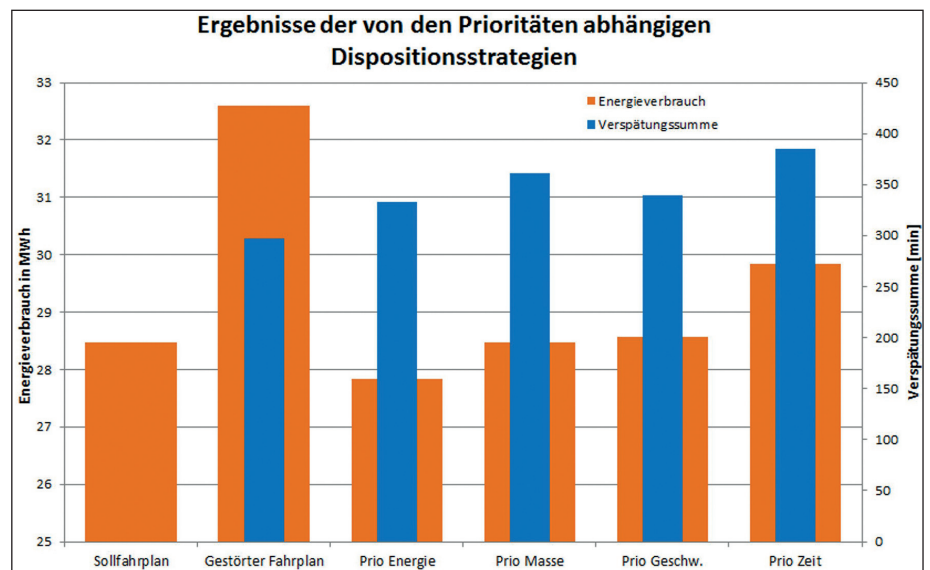


Abb. 6: Energieverbrauch und Verspätungssumme des Sollfahrplans sowie des gestörten Fahrplans (Istfahrplan) der Szenarien

Grafik: eigene Darstellung

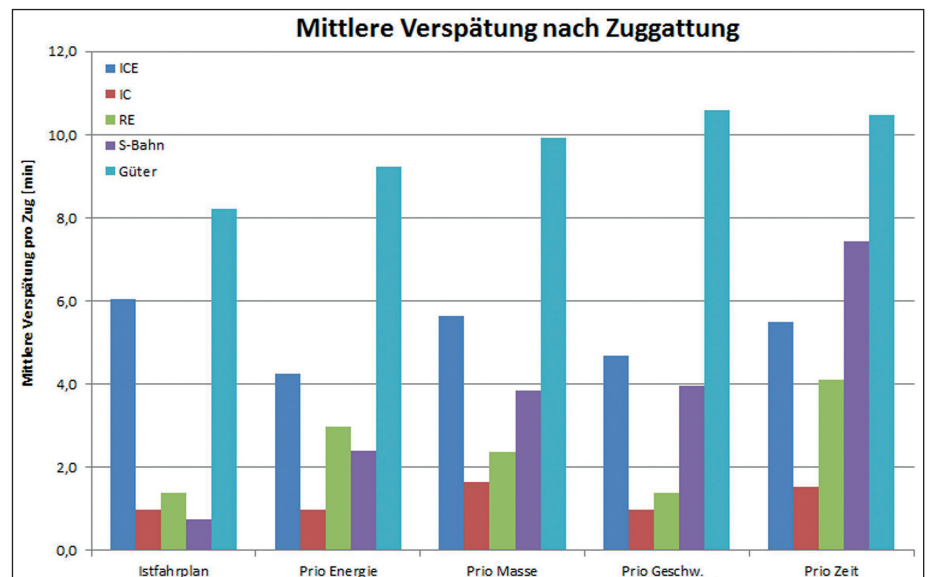


Abb. 7: Verspätungen der erstellten Fahrpläne nach Zuggattung

Grafik: eigene Darstellung

die hier durch den Fahrzeitverlust definiert wird, hat allerdings einen positiven Effekt auf die Streckenbelegungszeit.

Um die Verspätungen noch besser bewerten zu können, wurden diese nach Zuggattungen aufgesplittet (Abb. 7). Der gestörte Istfahrplan ist wieder die maßgebliche Referenz für die manuell erstellten Fahrpläne der Szenarien Prio Energie bis Prio Zeit. Der ICE besitzt bei allen Priorisierungsstrategien eine hohe Priorität, daher wird dort die Verspätung in allen Fällen reduziert. Regionalverkehr und S-Bahn besitzen fast überall die niedrigste Priorität, daher sind hier die stärksten Verspätungsanstiege zu beobachten. Dass die Güterzüge im Fahrplan Prio Geschw. die größten Verspätungen aufweisen ist nachvollziehbar, da sie dort die niedrigste Priorität besitzen. Dass die Güterzüge in allen Szenarien hö-

here Verspätungen aufweisen, liegt an deren größerer Einbruchsverspätung.

Fazit und Ausblick

Die gezielte Priorisierung von Zügen nach energetischen Kriterien zeigt messbare Effekte. Wenn Züge bevorzugt behandelt werden, die bei einem außerplanmäßigen Halt einen sehr hohen Energieverbrauch aufweisen, kann bis zu 14% der Traktionsenergie eingespart werden. Dies hat allerdings negative Auswirkungen auf die Pünktlichkeit, insbesondere im Personennahverkehr.

Es zeigte sich, dass bei der isolierten Knotenbetrachtung wie im Fall Lehrte durch die Harmonisierung der Geschwindigkeiten die größten Energieeinsparungen realisierbar sind. Es ist denkbar, dass bei der Betrachtung einer längeren Strecke auch

sinnvoll gewählte Überholungen einen Einfluss haben können. Für zukünftige Betrachtungen ist insbesondere eine vergleichende Bewertung von Energieverbrauch

und Verspätung umzusetzen, beispielsweise durch eine Kostenfunktion. Da eine manuelle Bearbeitung von Störfällen keine optimalen Ergebnisse hervorbringen kann, muss die Thematik in der weiteren Forschung automatisiert behandelt werden. Das DLR entwickelt eine Software für ein operatives Verkehrsmanagement, in dem verschiedene Dispositionsentscheidungen simuliert, bewertet und dem Disponenten empfohlen werden. Im Rahmen der Grundlagenforschung des DLR werden weiterhin Energieoptimierungspotenziale für den statischen Fahrplan betrachtet. Da hierbei Güterzügen eine höhere Priorität eingeräumt werden muss, können damit

auch Aussagen zur Wirkung von Gütervorrangkorridoren im deutschen Bahnnetz getroffen werden.

LITERATUR

- [1] Energymiser: <http://www.ttgtransportationtechnology.com/products/energymiser.html>, 02.11.2012 um 12.00 Uhr
- [2] CATO: <http://www.transrail.se/cato.php?lang=en>, 02.11.2012 um 12.00 Uhr
- [3] Kaufmann, R.: Disposition bei der DB Netz AG – Entwicklung eines rechnergestützten Assistenzsystems, Vortrag: FBS-Anwendertreffen am 10. Mai 2012, Erfurt
- [4] Schumann, T.; Scheier, B.; Kohlruß, J.: Meilensteinbericht 31.1.4 Energieeffizienter Bahnbetrieb, Teilprojekt Next Generation Operation des grundfinanzierten Projekts Next Generation Railway System, DLR e.V., Braunschweig, 2011
- [5] Eickmann, C.; Schumann, T.; Kohlruß, J.: Hafenhinterland – Effiziente Bewertung von Maßnahmenvorschlägen, in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 4/2010, S. 198–203



Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH)
Benedikt Scheier

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
DLR e.V., Institut für
Verkehrssystemtechnik, Abteilung
Bahnsysteme, Braunschweig
benedikt.scheier@dlr.de



Dipl.-Ing. Tilo Schumann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
DLR e.V., Institut für
Verkehrssystemtechnik, Abteilung
Bahnsysteme, Braunschweig
tilo.schumann@dlr.de



Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH)
Jacob Kohlruß

bis August 2012: wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Abteilung Bahnsysteme, Braunschweig

Summary

Train path allocation strategies for energy-efficient railway operation

Energy-efficient railway operation promises cost reductions without need for expensive infrastructure changes. While most related research activities are limited to the way of driving and to the development of systems to give hints to the driver, DLR is investigating how targeted train path allocation strategies (mainly by changing the sequence of trains) may lead to energy-savings? It was demonstrated that a targeted train priority management following energy-efficiency criteria can have perceptible effects. If priority is given to certain trains with high energy-consumption due to unscheduled stops, up to 14% of traction energy can be saved, although this may have some negative consequences on punctuality. Further studies must be carried out to compare the effects of energy-consumption and delays.

Handbuch Erdbauwerke der Bahnen

Planung – Bemessung – Ausführung – Instandhaltung



Handbuch Erdbauwerke der Bahnen informiert über die wesentlichen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Oberbau, Unterbau und Untergrund unter den Einwirkungen aus dem System Fahrzeug-Fahrweg. Einbezogen wurden wesentliche Änderungen und Erweiterungen, wie vor allem

- die Einführung des Eurocode 7 (EC 7) mit dem neuen Teilsicherheitskonzept bei der Bemessung geotechnischer Bauwerke der Eisenbahn,
- die Weiterentwicklung der Richtlinie Ril 836 der DB AG,
- der neu entwickelte Nachweis der dynamischen Stabilität als Teil des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit,
- Neuentwicklungen in der Bau- und Verfahrenstechnik,
- Änderungen bei Begriffen, Definitionen und Formelzeichen sowie
- neuentwickelte Berechnungsbeispiele nach EC 7.

Dieses Handbuch ist ein **praxisorientiertes Nachschlagewerk** und eine Handlungsanleitung für ein instandhaltungsarmes Fundament des Fahrweges.

ISBN: 978-3-7771-0430-0

Preis: EUR 68,00; 555 Seiten